

羊粪-玉米秸秆高温堆肥优化配比研究

宋 春^{1,2}, 徐 锋¹, 赵 伟¹, 叶 芳¹, 王齐利¹, 杨文钰^{2*}

(1. 四川农业大学环境学院生态环境研究所, 成都 611130;

2. 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 成都 611130)

摘要:【目的】研究不同玉米秸秆添加量对羊粪好氧高温堆肥腐熟进程的影响,寻求羊粪高温堆肥时与玉米秸秆的最佳配比。【方法】将羊粪和玉米秸秆按体积比 10:0,8:2,6:4,4:6 和 2:8 设置 5 个堆肥处理,通过测定不同配比有机物料堆肥过程中温度、pH、养分含量和发芽指数的变化情况,判断各处理堆肥的腐熟速度及预期肥效。【结果】相比纯羊粪,添加玉米秸秆的处理缩短了堆肥进入高温发酵期的时间,延长了高温期的持续时间。堆肥结束时,体积比 6:4 的羊粪和玉米秸秆混合堆肥有机质含量较堆肥初期下降 33.47%,速效 N 含量较初期下降 14.15%,在所有处理中降幅均为最小;相反,全 N 含量较初期提升 19.97%,全 P 含量提升 8.07%,速效 P 含量提升 31.16%,全 K 含量提升 24.81%,速效 K 含量提升 25.44%,在所有处理中增幅均为最大。将种子发芽指数>80%作为堆肥腐熟的评价标准,羊粪和玉米秸秆体积比为 6:4 堆肥的发芽指数最先达到 80%,腐熟时间为 27 d,比纯羊粪堆肥腐熟时间减少 1/2。【结论】添加玉米秸秆可以加快羊粪进入高温发酵期的速度,加快堆肥腐熟的进程。实际应用中,建议羊粪与玉米秸秆按体积比 6:4 进行堆肥。

关键词:羊粪;玉米秸秆;高温堆肥;腐熟速度

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2650(2018)02-0138-07

Research on the Optimum Ratio of Sheep Manure and Maize Straw for High Temperature Compost

SONG Chun^{1,2}, XU Feng¹, ZHAO Wei¹, YE Fang¹, WANG Qi-li¹, YANG Wen-yu^{2*}

(1.Institute of Ecological and Environmental Sciences, College of Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China)

Abstract:【Objective】Livestock manure and crop straw from agricultural system were the main sources of non-point pollution, and how to reuse them as resources was an inevitable requirement for the development of sustainable agriculture. The purpose of this paper was to find the optimum ratio of sheep manure composting with maize straw, based on the study results of high temperature composting process of sheep manure by added different amount of maize straw. 【Method】An composting experiment included 5 treatments of different volume ratio of sheep manure and maize straw by 10:0, 8:2, 6:4, 4:6 and 2:8 was carried out to study the changes of temperature, pH, nutrients content and germination index of organic materials during composting, so as to further judge the maturity rate and expected fertilizer efficiency of different composting treatments. 【Result】Compared with the pure sheep manure, addition of maize straw shortened the time of researching high temperature fermentation and increased the duration of the high temperature period. Compared with the initial stage of composting, the organic

收稿日期:2017-09-24

基金项目:国家自然科学基金(31771726);四川省科技厅重点研发项目(2017SZ0028)。

作者简介:宋春,博士,副教授。* 责任作者:杨文钰,教授,主要从事大田作物复合种植方面研究, E-mail: mssiyangwy@sicau.edu.cn。

matter content of 6:4 volume ratio mixture of sheep manure and maize straw at the end of composting decreased by 33.47%, and the available nitrogen content decreased by 14.15%, which were the minimal decrease in all treatments. On the contrary, the total N content of 6:4 volume ratio mixture of sheep manure and maize straw at the end of composting increased by 19.97%, total P content increased by 8.07%, available phosphorus content increased by 31.16%, total potassium content increased by 24.81%, and available potassium content increased by 25.44%, which were the largest increase in all treatments. We used the seed germination index (GI) to evaluate the maturity of compost, the results showed that the GI of 6:4 volume ratio mixture of sheep manure and maize straw reached 80% earliest in all treatments, 27 days to maturity, saved one half of times than the pure sheep manure composting. **【Conclusion】** Add maize straw can accelerate the sheep manure pile into high temperature fermentation speed, accelerate the composting process. In practical application, suggestions of sheep manure and maize straw compost according to volume ratio of 6:4.

Key words: sheep manure; maize straw; high temperature composting; decomposition rate

随着现代种植业和养殖业规模化的快速发展,作物秸秆和畜禽粪便等农业废弃物越来越多。据估算,近年来我国每年产生 6.5~7 亿 t 秸秆,但秸秆还田率不足 50%;畜禽粪便年产生量约为 17.3 亿 t,其中 90%以上来自牛粪、猪粪、和羊粪^[1-2]。大量的作物秸秆和禽畜粪便暴露于土壤、水、空气等环境要素中,如不加以无害化处理,将对农产品生产区的生态环境造成严重影响^[3-4]。近年来,随着人们生活水平的提高以及生态环境的恶化,国家大力提倡种养结合,发展绿色农业。然而要实现农业可持续发展,首先要解决的问题是如何将农业废弃物资源化利用,这也是目前国内外研究的热点。

国内外众多研究表明,相比填埋、焚烧和直接还田等方式,堆肥因其对环境影响小、成本低等优势是最为经济环保的一种处理农业废弃物的方式^[5]。一方面,将农业废弃物堆制成有机肥施入农田可降低化肥的施用,从而减少环境污染^[3];另一方面堆肥的施用可弥补土壤有机质消耗,增加碳沉积,降低温室气体的排放^[6];此外,有研究表明堆肥过程中的高温阶段可杀灭有机物料中的病原菌,施用到农田土壤后,可作为一种抵抗病菌的抑制剂,提高作物的抗病能力^[7-8]。不同比例下的动物粪便和作物秸秆对堆肥腐熟的速度及种子萌发、作物生长等影响较大^[9-10]。然而,以往对于粪便与秸秆的混合利用技术研究多集中于鸡粪、牛粪、猪粪与麦秆、稻秆等农作物秸秆的混合^[11-12],关于氮磷含量较高的羊粪与生物量较大的玉米秸秆混合堆肥利用技术尚缺乏系统研究。本研究通过对羊粪和玉米秸秆不同比例混

合高温堆肥腐熟进程中有机物料的养分浓度变化及相关生理生化指标的监测,筛选羊粪和玉米秸秆高温堆肥的最适配比,旨在为羊粪和玉米秸秆高效资源化利用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试玉米秸秆采自四川农业大学现代农业研发基地(四川农业大学崇州试验基地),将田间试验中前茬玉米收获后所得的风干秸秆切成长为 3 cm 左右的小段;羊粪采自桤泉镇当地农户家养殖的新鲜羊粪便。玉米秸秆及羊粪理化性质见表 1。

1.2 试验设计

堆肥前先将粉碎的玉米秸秆用水浸泡湿润,然后将羊粪与玉米秸秆分别按体积比 10:0、8:2、6:4、4:6 和 2:8 混合均匀,控制所有处理含水量保持在 55%左右,采用条形垛式堆置,堆体长、宽、高分别为 2.0、1.50、1.0 m,3 次重复。试验期间每 3 d 翻堆(用铁锹上下搅拌)1 次,同时调节堆堆水分含量,使其保持在 55%左右。堆肥时间为 2016 年 7 月 19 日至 2016 年 9 月 17 日,共计 61 d。试验地点设置在四川农业大学崇州试验基地玉米地旁空地,搭建设防雨棚,通风条件良好。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 温度、pH 值、发芽指数的测定

每天上午 10:00 将土壤温度测试仪垂直插入堆肥顶部中央,测定 40~50 cm 处堆肥发酵层的温度,同时用普通的大气温度计测定环境温度。每次翻堆

表 1 玉米秸秆及羊粪理化性质
Table 1 The physical and chemical properties of maize straw and sheep manure

有机物料 Organic materials	pH	有机碳 Organic C /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)	速效氮 Available N /(g·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(g·kg ⁻¹)
玉米秸秆	—	522.30	6.17	2.18	22.80	—	—	—
羊粪	9.0	199.83	15.23	15.20	28.24	3.76	3.96	17.90

充分拌匀后,从不同配比堆肥中称取 5.00 g 堆肥鲜样放于三角瓶中,加入 50 mL 蒸馏水。在振荡箱中以 150 r/min 的速度振荡 30 min 后,继续在离心机中以 4 500 r/min 离心 20 min,过滤后测定 pH 值。同时吸取过滤上清液 8 mL,加到铺有 2 张滤纸的 9 cm 培养皿内,每个培养皿点播 20 粒饱满的白菜 (*Beassica pekinensis*) 种子,30 ℃ 下培养 48 h 后测发芽率和根长,每处理重复 3 次,对照组为蒸馏水。按式(1)计算种子发芽指数^[13]:

发芽指数 GI= $\frac{\text{处理发芽率} \times \text{处理根长}}{\text{空白发芽率} \times \text{空白根长}} \times 100\%$ (1)

1.3.2 有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、全钾和速效钾的测定

堆肥当天和之后每隔 8 d 测定一次养分含量,在不同配比堆肥中随机多点采集 50 g 鲜样,取一小部分测定含水量,其余样品自然风干,粉碎后过 2 mm 筛。分别采用重铬酸钾容量法-外加热法^{[14]107-108}、硫酸-水杨酸-催化剂消化法^{[14]150}、NaCl 浸提-Zn-FeSO₄ 还原蒸馏法^{[14]150-152}、硫酸-硝酸消煮-钼钼黄比色法^{[14]313-314}、1/2NaHCO₃ 法^{[14]180}、浸提-钼钼黄比色法^{[14]180}、硫酸-硝酸消煮-火焰光度法^{[14]190}、NH₄OAc 浸提-火焰光度

法^{[14]194} 测定堆体中有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、全钾和速效钾的含量^[14]。

1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 进行统计分析绘图,图表中显示数据均为 3 次重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 羊粪和玉米秸秆不同配比堆肥的温度变化

如图 1 所示,在整个堆肥过程中环境温度虽有一定波动,但总体上均处于 25 ℃ 以上,属于夏季高温期。从堆肥第 2 天开始,所有处理堆内的温度均显著高于环境温度,但各处理升温速度差异较大,羊粪与玉米秸秆体积比 6:4、4:6 和 2:8 处理升温较快,均在堆肥的第 2 天进入高温期(>50 ℃),8:2 堆肥次之,在堆肥第 4 天进入高温期,纯羊粪堆肥所需时间最长,在堆肥第 8 天进入高温期。从高温期的持续时间来看,羊粪与玉米秸秆体积比 6:4 处理最长,持续 33 d。其次是 4:6 处理,持续 27 d。8:2 处理持续 23 d,而 2:8 和 10:0 处理持续时间相对较短,分别持续 18 d 和 16 d。

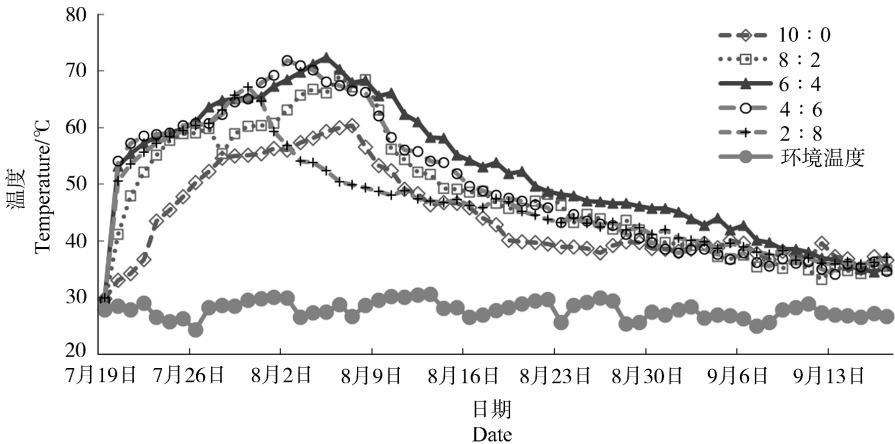


图 1 羊粪和玉米秸秆不同配比堆肥的温度变化

Figure 1 Changes of temperature during composting of sheep manure added in different ratios of maize straw

2.2 羊粪和玉米秸秆不同配比堆肥的 pH 变化

如图 2 所示,随堆肥时间的延长,所有处理堆

肥的 pH 均由发酵初始的 8.6~9.0 上升至 9.2~9.6,维持一段动态平衡后均降落到初始水平左右 (8.5~

8.9), 其中 10:0 和 8:2 处理堆肥结束时 pH 与堆肥初始相比有所降低, 6:4 和 4:6 处理基本持平, 2:8 处理有所升高。前人研究表明, 在堆肥初期, 堆体中大量有机酸分解, 生成 NH_3 导致 pH 升高。在堆肥中后期, 有机酸分解减少, NH_3 挥发速度放慢, 同时硝化菌的硝化作用产生大量的 H^+ , 中和碱性之后还有剩余, 从而造成 pH 值下降^[15]。相关结果表明, NH_3 的释放主要集中在堆肥前期, 如果能控制 pH 的上升, 就能够抑制臭气的产生, 减少氮素的损失^[12]。在本试验堆肥初期, 各堆肥 pH 的高低与羊粪在堆体中所占比重成正比, 说明添加玉米秸秆对羊粪堆肥初期的 pH 升高有一定的控制能力, 相应地对 NH_3 的挥发有一定的抑制作用。

2.3 羊粪和玉米秸秆不同配比堆肥对发芽指数的影响
发芽指数(GI)能够直接、有效地推测堆肥腐熟

程度, 检测堆肥样品中的毒性水平, 同时预测堆肥毒性的变化^[16]。因此, 发芽指数是评价堆肥无害化、稳定化程度的重要指标之一^[17]。有研究认为, 当 $\text{GI} > 50\%$ 时, 堆肥对植物已基本没有毒性, 堆肥已基本腐熟, 而当 $\text{GI} > 80\%$ 时, 可认为堆肥已经腐熟^[18]。

如图 3 所示, 随着堆肥的进行, 各堆肥的种子发芽指数均呈上升趋势, 说明各堆肥中抑制种子发芽的有害物质在堆肥进程中被慢慢消除, 堆肥对植物的毒害作用在逐渐减弱。其中羊粪与玉米秸秆体积比 6:4 的发芽指数上升最快, 在堆肥的第 10 天达到 50.90%, 第 28 天达到 81.03%, 其次是 4:6 和 8:2 处理, 10:0 和 2:8 处理最慢。若以发芽指数 $> 80\%$ 作为堆肥腐熟的评价指标, 羊粪与玉米秸秆体积比 10:0、8:2、6:4、4:6、2:8 的堆肥分别需要 57 d、51 d、27 d、36 d 和 57 d 才能达到腐熟。

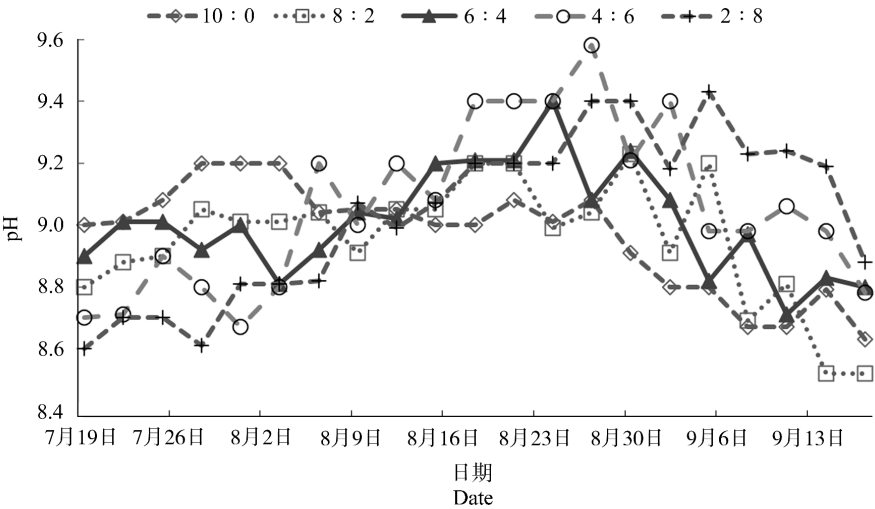


图 2 羊粪和玉米秸秆不同配比堆肥的 pH 变化
Figure 2 Changes of pH during composting of sheep manure added in different ratios of maize straw

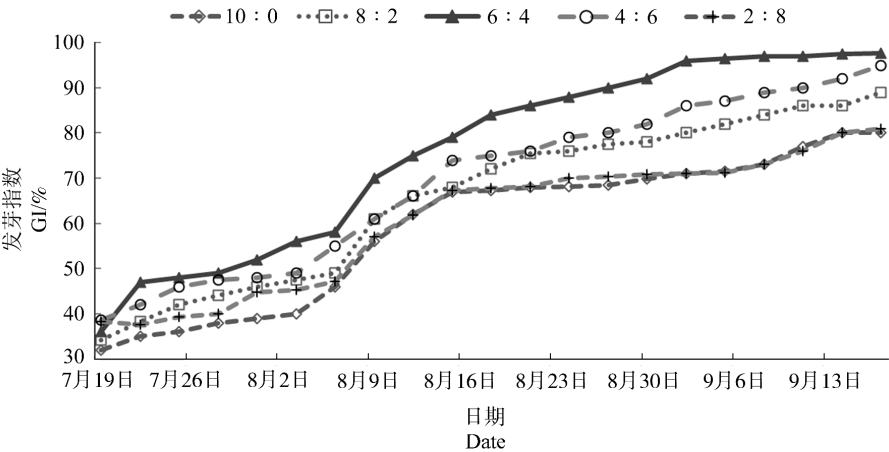


图 3 羊粪和玉米秸秆不同配比堆肥对白菜种子发芽指数的影响
Figure 3 Changes of germination index (GI) of *Beassica pekinensis* as affected by compost of sheep manure added in different ratios of maize straw

2.4 羊粪和玉米秸秆不同配比堆肥有机质、全氮和 C/N 的变化

如图 4 所示,随着堆肥的进行,各处理堆肥中的有机质含量均有所下降。堆肥结束时,各处理堆

肥有机质含量介于 202.83~448.84 g/kg 之间。在堆肥初期,羊粪与玉米秸秆体积比 10:0 和 8:2 处理堆肥的全氮含量较高,堆肥前 8 d 均有明显下降,随后趋于平稳;体积比 6:4、4:6 和 2:8 处理堆肥全氮含量

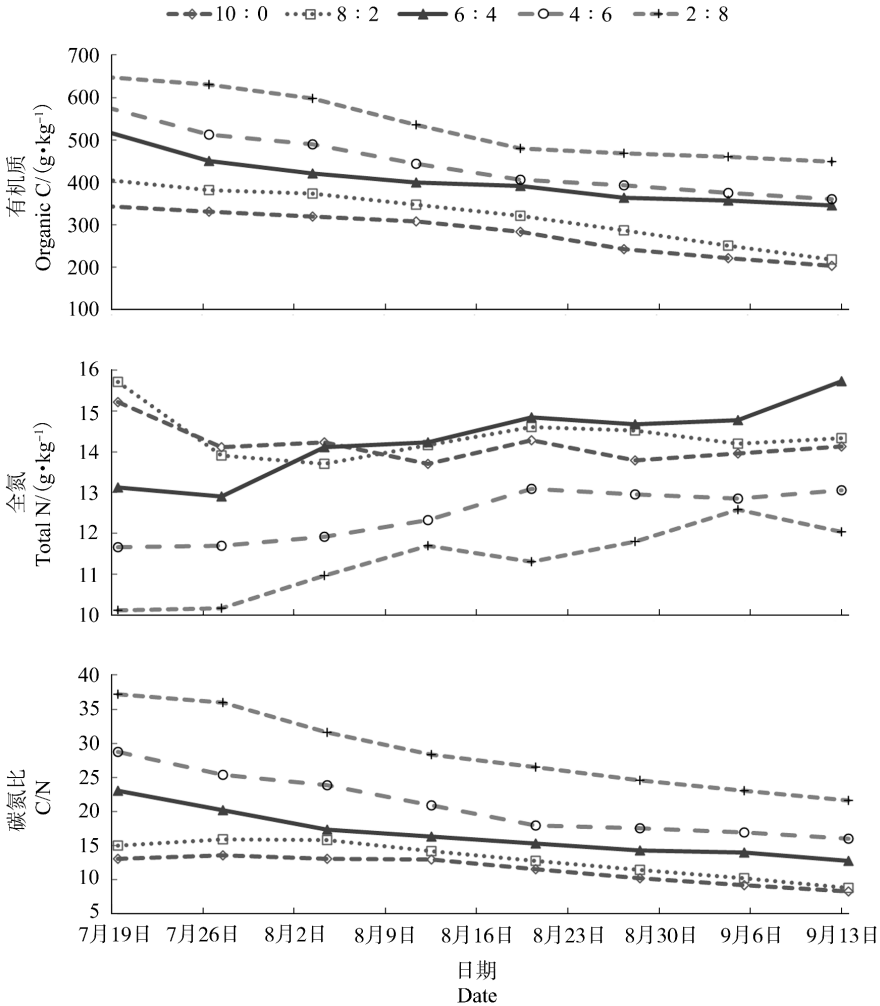


图 4 羊粪和玉米秸秆不同配比堆肥有机质、全氮和 C/N 的变化

Figure 4 Changes of organic matter, total nitrogen and C/N ratio during composting of sheep manure added in different ratios of maize straw

均有所增加。在堆肥结束时,羊粪和玉米秸秆体积比 6:4 处理堆肥全氮含量最高,分别高于 10:0、8:2、4:6 和 2:8 处理堆肥 11.32%、9.84%、20.52%和 30.73%。

从堆肥 C/N 来看,羊粪与玉米秸秆体积比 2:8 和 4:6 处理的 C/N 下降幅度较大,这是由其碳素含量高,分解较快,而氮素损失较少所致。10:0 和 8:2 处理堆肥的 C/N 变化不大,是因为初始 C/N 过低,碳素分解较慢,氮素损失严重。在堆肥结束,各处理堆肥 C/N 按羊粪所占比重由大到小的分别为 8.32、8.83、12.74、16.00、21.62。

2.5 羊粪和玉米秸秆不同配比堆肥养分的变化

由表 2 所示,在堆肥结束时,各处理堆肥的速

效氮含量较堆肥初期均有所下降,降幅为 14.15%~34.43%,其中 2:8 处理堆肥降幅最大,为 34.43%;6:4 处理堆肥的降幅最小,为 14.15%。在堆肥结束时,所有处理堆肥的全磷、速效磷、全钾和速效钾含量较堆肥初期均有所增加,分别增加了 2.37%~8.07%、1.77%~31.16%、12.64%~24.81%和 5.03%~25.44%,其中羊粪与秸秆体积比 6:4 处理堆肥的增幅均为最大,分别为 8.07%、31.16%、24.81%和 25.44%。

3 讨论与结论

农田化肥施用、农田固体废弃物、畜禽粪便、水产养殖垃圾和农村生活污染,构成了我国农业面源

表 2 羊粪和玉米秸秆不同配比堆肥养分的变化

Table 2 Changes of nutrients of sheep manure compost added in different ratios of maize straw g·kg⁻¹

养分指标 Nutrients index	10:0		8:2		6:4		4:6		2:8	
	初期	结束	初期	结束	初期	结束	初期	结束	初期	结束
全磷	15.20	15.56	14.02	14.95	13.76	14.87	13.77	14.46	13.62	13.95
全钾	28.24	34.25	28.01	31.82	28.25	35.26	28.87	34.28	30.21	34.03
速效氮	3.76	2.77	3.69	2.73	3.11	2.67	2.22	1.50	1.83	1.20
速效磷	3.96	4.03	3.88	4.25	3.37	4.42	3.19	4.09	2.43	2.64
速效钾	17.90	18.80	21.79	23.88	22.60	28.35	26.80	28.78	26.32	27.76

污染的五大污染源。就农业面源污染中总氮和总磷的贡献度而言,化肥施用和畜禽养殖当属前两位^[19]。此外,作物秸秆是农业废弃物的重要组成,如不加以处理,大量堆积势必造成环境污染和作物减产。因此,加大畜禽粪便和作物秸秆的无害化处理力度,加速其资源化利用进程对保护环境和农业可持续发展是极为重要的。

经过长期实践积累,中国农业废弃物资源化利用领域已经初步形成了固态废弃物燃料化、肥料化、基料化、饲料化、材料化等“五料化”利用和废水的无害化处理技术体系^[20],其中堆肥因其对环境影响小、成本低等优势是最为经济环保的一种将农业废弃物肥料化的方式。在堆肥过程中,有机废弃物中的有机物质通过好氧嗜热、嗜常温微生物的降解,转化成 CO₂、H₂O 和 NH₄⁺等矿质态养分以及稳定的有机质^[21]。堆肥的最终产品应是一种稳定的,富含腐殖质的,能够改善土壤物理性质和肥力特征的复合物^[22]。将其施入土壤后在提高地力的同时,可减少化肥施用,从而大大降低农田土壤潜在的面源污染发生的风险。

影响堆肥进程的因素主要包括温度、初始 C/N、通气情况、肥堆紧实度、水分含量及 pH。堆肥一般可划分成 3 个阶段,即产热阶段、高温阶段、腐熟阶段。在高温阶段,微生物活性最强,转化有机废弃物的能力最强^[23],有机废弃物通过微生物分解代谢产生的热量积聚在肥堆内造成的高温有利于杀灭病原菌^[24]。美国环境保护署规定堆肥过程中肥堆温度累计 15 d 以上或连续 5 d 高于 55 ℃即可达到腐熟标准^[25]。我国粪便无害化卫生要求(GB7959-2012)规定,堆肥温度达到高温的理想温度 50 ℃~70 ℃,并在此区间保持 5~7 d 以上,基本可以杀死堆体中致病微生物,即可达到堆肥无害化。本试验中所有堆肥处理高温阶段持续时间达 16~33 d,均符合堆肥卫生标准,表明无论添加玉米秸秆与否,羊粪按

照堆肥的方式经过一定时间的堆制,均可达到粪便无害化的要求。但适宜的羊粪和玉米秸秆配比可以加快堆肥进入高温发酵期的速度,提升 C/N 的降低效率,同时能够有效地控制堆肥 pH 维持在稳定的区间。本试验所有处理堆肥结束时有机质含量介于 202.83~448.84 g/kg 之间,pH 均稳定维持在 8.5~8.9,均符合腐熟标准。各处理堆肥的有机质含量及 pH 均以羊粪与玉米秸秆体积比 6:4 和 4:6 居中,较为适宜改良酸性土壤。若以发芽指数>80%作为堆肥腐熟的评价指标,羊粪与玉米秸秆体积比 10:0、8:2、6:4、4:6、2:8 的堆肥分别在 57 d、51 d、27 d、36 d 和 58 d 达到腐熟。由此可见,适宜的羊粪和玉米秸秆配比能够减少堆体中对植物有害物质的产生,加快堆肥的腐熟进程。其中羊粪和玉米秸秆体积比 6:4 混合堆肥的腐熟速度最快,所需时间最少,仅为纯羊粪堆肥所需时间的一半。

农业废弃物堆肥除了要满足无害化的强制要求外,其堆制后的养分含量关系到其施入农田后的肥效,对其实际的应用价值有较大影响。本研究中羊粪与玉米秸秆体积比 10:0 和 8:2 处理堆肥的全氮含量在第一次翻堆取样时有所下降,随后趋于平稳。这两个堆肥初期的 C/N 较低,碳源成为微生物生长重要的限制因素,有机物的分解速度慢,大量的氮素在堆肥初期随着温度的升高而出现损失。体积比为 6:4、4:6 和 2:8 处理堆肥也存在一定的氮素损失,但损失远小于前者,同时由于堆体重量减轻相对较大,因此其全氮含量相对上升。由此说明,羊粪堆肥时添加玉米秸秆,可补充碳源,有效地降低氮素的损失。但过量添加碳源不利于堆肥腐熟,且最终形成的 C/N 较高的有机物料(如本试验中的羊粪与玉米秸秆体积比为 2:8 处理在堆肥结束后 C/N 为 21.62,仍大于 20)施入土壤后会被土壤中的微生物继续降解,从而与作物争夺氮源。磷素和钾素在堆肥过程中不会挥发损失,因此,随着堆肥过程中

有机物料总重量的减少,其含量会有所升高。从养分含量上来讲,本试验各处理中,以羊粪和玉米秸秆体积比 6:4 处理效果最好,其堆肥结束后的有机质和速效氮含量较堆肥初期分别下降了 33.47% 和 14.15%,降幅最小;全氮、全磷、速效磷、全钾和速效钾含量分别增加了 19.97%、8.07%、31.16%、24.81% 和 25.44%,增幅最大。

综合来看,本研究得出羊粪和玉米秸秆按体积比 6:4 混合堆肥进入高温阶段较早,高温持续时间最长,GI 指数最早达到 80% 以上,且养分含量最高。因此实际生产中建议将羊粪和玉米秸秆按体积比 6:4 进行混合好氧高温堆肥。然而本研究的试验阶段处于夏季高温阶段,在冬季低温阶段情况是否会发生变化以及环境温度对堆肥腐熟进程的影响机理尚有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 彭靖. 对我国农业废弃物资源化利用的思考[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 794-798.
- [2] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 11(3): 29-33.
- [3] NKO A R. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 473-492.
- [4] HONG J, REN L, HONG J, et al. Environmental impact assessment of corn straw utilization in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(12): 1700-1708.
- [5] LIM S L, LEE L H, WU T Y. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016 (111): 262-278.
- [6] LUO W H, YUAN J, LUO Y M, et al. Effects of mixing and covering with mature compost on gaseous emissions during co-composting[J]. *Chemosphere*, 2014, 117(1): 14-19.
- [7] QIU M, ZHANG R, XUE C, et al. Application of bio-organic fertilizer can control Fusarium wilt of cucumber plants by regulating microbial community of rhizosphere soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(7): 807-816.
- [8] BIELSKÁL, KAH M, SIGMUND G, et al. Bioavailability and toxicity of pyrene in soils upon biochar and compost addition[J]. *Science of the Total Environment*, 2017(595): 132-140.
- [9] 徐长林, 鱼小军, 景媛媛, 等. 牦牛粪和藏羊粪浸提液对高寒草甸六种植物种子萌发特性的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 2988-2994.
- [10] 王凡. 长期秸秆还田及施用粪肥对小麦产量和矿质营养品质及重金属的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [11] 兰时乐, 曹杏芝, 戴小阳, 等. 鸡粪与油菜秸秆高温堆肥中营养元素变化的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(3): 564-569.
- [12] 黄向东, 韩志英, 石德智, 等. 畜禽粪便堆肥过程中氮素的损失与控制[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 247-254.
- [13] 张鸣, 高天鹏, 刘玲玲, 等. 麦秆和羊粪混合高温堆肥腐熟进程研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 27(3): 135-138.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] SMARS S, GUSTAFSSON L, BECH-FRIIS B, et al. Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control[J]. *Biore-source Technology*, 2002, 84(3): 237-241.
- [16] BERNAL M P, ALBURQUERQUE J A, MORAL R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment[J]. *Biore-source Technology*, 2009, 100 (22): 5444-5453.
- [17] 李洋, 席北斗, 赵越, 等. 不同物料堆肥腐熟度评价指标的变化特性[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(6): 623-627.
- [18] KO H J, KIM K Y, KIM H T, et al. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure[J]. *Waste Management*, 2008, 28(5): 813-820.
- [19] 闵继胜, 孔祥智. 我国农业面源污染问题的研究进展[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2016(2): 59-66.
- [20] 宋成军, 张玉华, 李冰峰. 农业废弃物资源化利用技术综合评价指标体系与方法[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 289-293.
- [21] QIAN X, SHEN G, WANG Z, et al. Co-composting of livestock manure with rice straw: characterization and establishment of maturity evaluation system[J]. *Waste Management*, 2014, 34(2): 530-535.
- [22] WATTEAU F, VILLEMIN G. Characterization of organic matter microstructure dynamics during co-composting of sewage sludge, barks and green waste [J]. *Biore-source Technology*, 2011, 102 (19): 9313-9317.
- [23] JURADO M M, SUÁREZ-ESTRELLA F, VARGAS-GARCÍA M C, et al. Evolution of enzymatic activities and carbon fractions throughout composting of plant waste[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014(133): 355-364.
- [24] SINGH J, KALAMDHAD A S. Potential for composting of green phumdi biomass of Loktak lake [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 67(67): 119-126.
- [25] Environmental Protection Agency. Environmental regulations and technology: control of pathogens and vector attraction in sewage sludge[R]. Washington, D.C: EPA, 625-R-92-013, 2003.

(本文审稿: 杜彩艳; 责任编辑: 刘诗航; 英文编辑: 刘诗航)